

<https://helda.helsinki.fi>

Helsingin seisminen asemaverkko ja seismisyys 2020

Veikkolainen, Toni

Institute of Seismology, University of Helsinki
2021

Veikkolainen , T , Oinonen , K , Vuorinen , T , Kortström , J , Mäntyniemi , P , Lindblom , P ,
Uski , M & Tiira , T 2021 , Helsingin seisminen asemaverkko ja seismisyys 2020 . Report ,
Nro T-103 , Institute of Seismology, University of Helsinki . <
<http://hdl.handle.net/10138/326738> >

<http://hdl.handle.net/10138/333552>

cc_by
publishedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

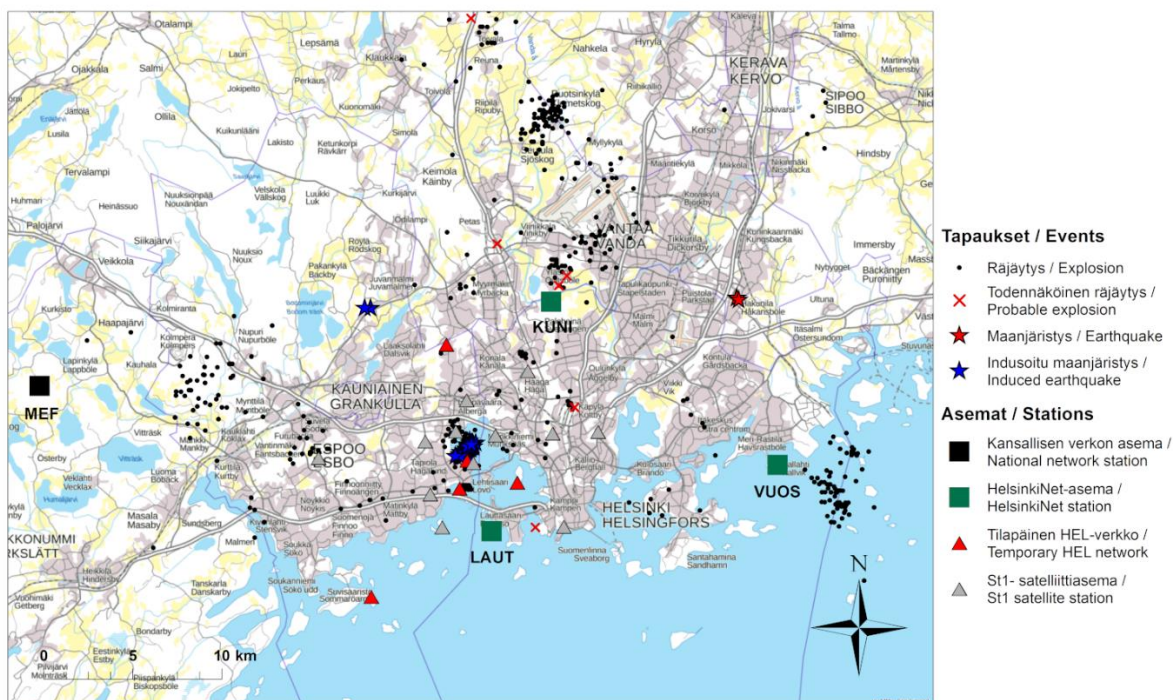
This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Please cite the original version.

HELSINGIN SEISMINEN

ASEMAVERKKO JA SEISMISYYS 2020



Kansi: Seismiset tapaukset Helsingissä ja lähialueilla vuonna 2020.

Cover: Seismic events in Helsinki and its vicinity in 2020.

Seismologian instituutin raportti T-103

Päätoimittaja Timo Tiira

Julkaisija Seismologian instituutti
PL 68 (Pietari Kalmin katu 5)
00014 Helsingin yliopisto

Puh. +358 2941 51600

www.seismo.helsinki.fi

ISSN 0781-9579

ISBN 978-952-10-9603-7

<https://hdl.handle.net/10138/326738>

Helsinki 2021

Seismologian instituutti
Helsingin yliopisto
Raportti T-103

HELSINGIN SEISMINEN ASEMAVERKKO JA SEISMISYYS 2020

TONI VEIKKOLAINEN, KATI OINONEN, TOMMI VUORINEN, JARI
KORTSTRÖM, PÄIVI MÄNTYNIEMI, PASI LINDBLOM JA TIMO TIIRA

Seismologian instituutti
Geotieteiden ja maantieteen osasto
Helsingin yliopisto
Helsinki, Suomi

Esipuhe

Helsinki on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali (HNH) vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteeseen pääseminen edellyttää monien muiden toimenpiteiden ohella sitä, että maalämmön eli geoenergian osuus kasvaa merkittävästi Helsingin lämmitysenergian lähteenä. Pelkillä perinteisillä tonttikohtaisilla maalämpöratkaisuilla tavoitetta ei saavuteta. Tarvitaan kortteli- ja aluekohtaisia maalämpöjärjestelmiä ja nykyisten matalien energiakaivojen lisäksi syvempiä ja samalla enemmän energiaa tuottavia energiakaivoja. Syvempien kaivojen suuret porauskustannukset ovat toistaiseksi tehneet niistä perinteisiä energiakaivoja kalliimpia tuotettuun energiaan suhteutettuna. Tarvitaan lisää osaamista ja kokemusta yli 1 000 metrin syvyyteen ulottuvien geotermisten energiakaivojen toteuttamiseen, jotta niiden tuotantokustannukset saadaan kilpailukykyisiksi. Tiiviiseen kaupunkirakenteeseen on helpompi mahdollistaa nykyistä oleellisesti syvempiä energiakaivoja, joita tarvitaan myös selvästi vähemmän.

Maalämmön lisääminen ei yksin riitä HNH-tavoitteeseen pääsemiseksi. Tarvitaan myös geotermistä energiaa eli EGS-voimalaitoksia ja geotermisiä energiakaivoja. EGS-voimalaitosten on saatava aikaan mikrojärjestyksiä kulkureittien avaamiseksi kiertävälle nesteelle. Muussa tapauksessa EGS-voimalaitoshanke olisi epäonnistunut. Helsingin seismisyystaso on perinteisesti ollut matala. EGS-voimalaitokset, joissa kalliorakojen vedenjohtavuutta lisätään voimakkaan ylipaineistuksen avulla aiheuttavat mikromaanjärjestyksiä. Avoimet geotermiset energiakaivot, joissa kiertävää nestettä hukataan, voivat myös aiheuttaa mikromaanjärjestyksiä.

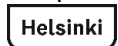
Geotermisen lämmöntuotannon vaikutusten seurauksia varten oli tarpeen saada Helsinkiin oma seisminen asemaverkko, jonka avulla voidaan paikallistaa sekä ihmisen aiheuttamat, että luonnolliset maanjärjestykset. Seismisen asemaverkon avulla voidaan paikallistaa myös erilaisten räjäytysten ja vastaavien tärinälähteiden sijainnit ja voimakkuudet ja näin auttaa viranomaisia vastaamaan suuren yleisön tärinöitä koskeviin ilmoituksiin ja tiedusteluihin.

Helsinkiin on vuoden 2020 aikana saatu toimintakuntoon kolme pysyvää seismistä havaintoasemaa, jotka muodostavat seismisen 'HelsinkiNet'-asemaverkon. Verkon asemat sijaitsevat Kuninkaantammassa, Lauttasaassa ja Vuosaassa muodostaen kolmion, jonka avulla maanjärjestyksen tai tärinän lähde pystytään varsin tarkasti paikallistamaan.

Helsingissä helmikuussa 2021

Ilkka Vähäaho
Maa- ja kallioperäyksikön päällikkö

Kaupunkiympäristö



Tiivistelmä

Seismologian instituutti perusti yhteistyössä Helsingin kaupungin kanssa vuosina 2019–2020 kolmesta seismisestä havaintoasemasta koostuvan HelsinkiNet-verkon. Verkon asemat toimivat Kuninkaantammessa (KUNI), Lauttasaarella (LAUT) ja Vuosaarella (VUOS) sekä valtakunnallisen että pääkaupunkiseudun asemaverkon automaattisten havaintojärjestelmien yhteydessä. Asemien kohinataso osoittautui sijaintiin nähden matalaksi ja pitkiä datakatkoja ei ollut. HelsinkiNet-asemien lisäksi pääkaupunkiseudun länsiosissa toimivat St1:n lämpövoimalahankkeen valvontaan perustetut asemat HEL1-HEL5. Vuonna 2020 vahvistettuja seismisiä tapauksia oli 30 km:n säteellä Rautatientorista 484. Suurin osa niistä oli räjäytyksiä. Indusoituja maanjäristyksiä tapahtui Espoossa erityisesti Otaniemessä mutta myös Koskelossa. Luonnollisia maanjäristyksiä oli kolme, niistä kaksi 0,7 magnitudin tapausta Hakunilassa ja yksi –0,5 magnitudin tapaus Laajarannassa. Vähintään 0,0 magnitudin indusoitujen ja luonnollisten maanjäristysten määrä oli 24. Suurin osa maanjäristysten kansalaishavainnoista liittyi St1:n Otaniemen hankkeeseen.

Abstract

In 2019–2020, the Institute of Seismology set up, in collaboration with the City of Helsinki, a seismic network, HelsinkiNet, consisting of three stations. The stations of the network were in operation in Kuninkaantammi (KUNI), Lauttasaari (LAUT), and Vuosaari (VUOS) in association with the automatic observation systems of Finland and the Helsinki region. The noise level of stations was low considering their locations, and no long interruptions to data delivery have taken place. In addition to HelsinkiNet, stations HEL1-HEL5 established for the monitoring of the St1 deep heat project were operational in the western part of Helsinki region. In 2020, the number of confirmed seismic events within 30 km from the Central Railway Station of Helsinki was 484, most of them explosions. Induced earthquakes happened in Espoo, particularly in Otaniemi, but also in Koskelo. Three natural earthquakes occurred, two of them were 0.7-magnitude events in Vantaa and one was a –0.5-magnitude event in Laajaranta. The number of natural and induced earthquakes of at least magnitude 0.0 was 24. Most of the macroseismic observations of earthquakes were associated with the St1 geothermal plant project in Otaniemi, Espoo.

Sisältö

Esipuhe	4
Tiivistelmä	5
Abstract	5
Sisältö	6
1. Johdanto	7
2. Seismiset havaintoasemaverkot Helsingissä ja lähialueella	7
3. Havainnot maanjäristyksistä vuonna 2020	16
3.1. Instrumentaaliset havainnot	16
3.2. Makroseismiset havainnot	18
4. Siirrostasoratkaisut	22
Lähdeluettelo	25
Liite 1. Vuoden 2020 seismisten tapausten analyysi	26
Liite 1.1. Luonnolliset ja indusoidut maanjäristykset ($M_L \geq 0.0$) Helsingissä ja lähialueella vuonna 2020	26
Liite 1.2. Siirrostasoratkaisujen määrityksestä	28

1. Johdanto

Helsingin yliopiston Seismologian instituutti alkoi vuonna 2019 suunnitella Helsingin kaupungin aloitteesta kaupunkialueelle kolmen seismisen havaintoaseman verkkoa (Luhta ym. 2019). Tämän HelsinkiNet-verkon tavoitteena on madaltaa seismisten tapausten havaintokynnystä ja parantaa niiden paikannustarkkuutta Helsingin alueella. Testimittausten jälkeen instituutti rakensi vuonna 2020 asemat Lauttasaareen, Kuninkaantammen ja Vuosaareen. Asemien sijainneissa huomioitiin testimittauksissa havaitun kohinatason lisäksi asemageometria. Tavoitteena on rekisteröidä seismisiä signaaleja Helsingin alueelta mahdollisimman kattavasti, ja siten tarjota tutkijoille sekä viranomaisille tietoa rakennetun ympäristön seismisyydestä. Toiminta on osa Suomen ja lähialueiden seismistä valvontaa (Kortström ym. 2018).

Tämä raportti perustuu Helsingin kaupungin ja Seismologian Instituutin väliseen elokuussa 2019 allekirjoitettuun sopimukseen HelsinkiNetin asennuksesta ja ylläpidosta. Sopimuksen mukaisesti Seismologian instituutti laatii vuosittain julkisen raportin verkon toiminnasta ja Helsingin alueen seismisistä havainnoista.

2. Seismiset havaintoasemaverkot Helsingissä ja lähialueella

HelsinkiNet on ensimmäinen Helsingin rajojen sisäpuolella sijaitseva seisminen asemaverkko. Verkon kolme asemaa KUNI (Kuninkaantammi), LAUT (Lauttasaari) ja VUOS (Vuosaari) on kaikki asennettu avokalliolle. Suomen kiteisessä kallioperässä seismiset aallot etenevät hyvin, ja siksi suurin osa Suomen muistakin seismisistä havaintoasemista on asennettu suoraan kalliolle. Porareikäasennukset ovat yleensä kalliimpia ja huollon kannalta hankalia.

Vuoden 2019 testimittauksissa (Luhta ym. 2020) valitut paikat Kuninkaantammen ja Lauttasaaren asemille jäivät lopullisiksi. Sen sijaan Vuosaaren asemalle oli etsittävä uusi sijainti, koska suurjännitelinja tuotti merkittävää häiriötä seismiseen signaaliin Itä-Vuosaassa. Uusi asemapaikka löytyi Kallahdenniemeltä. Asemista KUNI ja LAUT sijaitsevat kaivonrenkaan sisään rakennetussa laitesuojassa, kun taas VUOS sijaitsee rakennuksen alla (Kuva 1). Kaikki asemat ovat jatkuvan tietoliikenneyhteyden päässä ja toimittavat dataa Seismologian instituutin päivittäisanalyysiin.

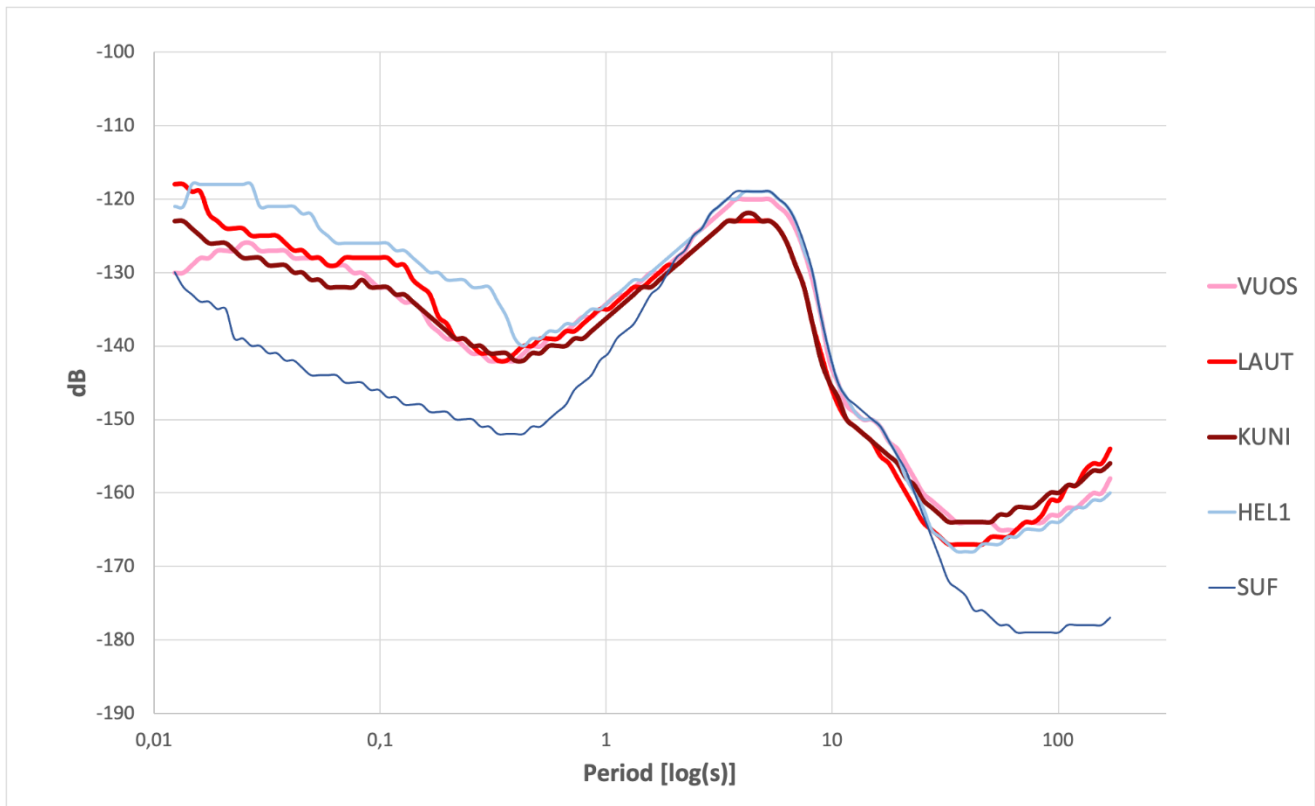


Kuva 1. Vasemmalla näkyy Lauttasaaren seismisen aseman laitesuoja ja oikealla Vuosaaren aseman maanalaista infrastruktuuria. LAUT-aseman betonikannen päälle joulukuussa 2020 asennettua lisäkantta ei näy keväällä 2020 otetussa kuvassa. VUOS-asemalla seismometri sijaitsee takaoikealla näkyvän betonikannen alla.

Figure 1. On the left, the protective environment of the Lauttasaari (LAUT) station and, on the right, the underground infrastructure of the Vuosaari (VUOS) station are shown. The additional cover installed on the concrete cover of LAUT is not visible in the photograph, which was taken in the spring of 2020. At VUOS, the seismometer is located below the concrete slab at the back right.

Vuoden 2020 kesän ja syksyn kokemukset vahvistivat asemapaikkatiedusteluista saatuja tuloksia asemien tuottaman datan hyvästä laadusta. Kuvassa 2 on esitetty HelsinkiNet-asemien keskimääräinen kohinataso. Vertailuna on esitetty Seurasaaren väliaikaisen aseman HEL1 ja Keski-Suomen maaseudulla sijaitsevan Sumiaisten kiinteän asemaverkon aseman SUF kohinatasot. HelsinkiNet-asemilla kohinatasot ovat lähellä toisiaan ja erot lyhyillä periodeilla (eli korkeilla taajuuksilla) johtuvat häiriölähteiden eroista asemien lähellä. Väliaikaisasema HEL1 erottuu kaikkein kohinaisimpana asemana korkeilla taajuuksilla. Syynä tähän on ensisijaisesti se, että seismometri on sijoitettu asuinrakennuksen kellaritilan lattialle kalliin kiinnitetyn betonipilarin sijaan. Kiinteä asema SUF sijaitsee puolestaan sisämaassa syrjässä ihmisen aiheuttamasta taustakohinasta. Tämä näkyy selkeästi matalampana kohinatasona korkeilla taajuuksilla. Kaikille asemille yhteinen leveä piikki n. 5

sekunnin (0.2Hz) kohdalla on globaalin seismisen taustakohinan maksimi, joka esiintyy kaikkialla maapallolla suunnilleen yhtä voimakkaana.



Kuva 2. HelsinkiNet-asemien keskimääräiset kohinatasot vuonna 2020 (punasävyiset viivat) ja vertailuna Seurasaaren väliaikaisen aseman HEL1 ja Sumiaisten kiinteän asemaverkon aseman SUF keskimääräiset kohinatasot vuonna 2020 (sinisävyiset viivat). Kuvassa Period tarkoittaa jaksoa.

Figure 2. The average noise levels of HelsinkiNet stations in 2020 (lines of reddish hue). Values for the temporary station in Seurasaari (HEL1) and for the station SUF (Sumiainen) of the permanent station network are shown for comparison (lines of bluish hue).

Ennen HelsinkiNetin perustamista Seismologian instituutti asensi viidestä asemasta koostuvan väliaikaisen tutkimusverkon erityisesti Espoon syväreikähankkeen valvontatarkoituksiin (Hillers ym. 2020; Veikkolainen ym. 2020). Kyseisen verkon asemat ovat HEL1 Helsingin Seurasaarella, HEL2 Espoon Otaniemessä, HEL3 Espoon Keilaniemessä, HEL4 Espoon Lintuvaarassa ja HEL5 Espoon Suvisaaristossa. Kaikki nämä asemat olivat edelleen vuonna 2020 toiminnassa ja täydensivät HelsinkiNet-verkkoa pääkaupunkiseudun länsiosassa.

Taulukkoon 1 on listattu Seismologian instituutin ylläpitämien Helsingin alueen seismisten asemien sijainnit. Mukana ei ole St1 Oy:n ylläpitämiä asemia, joita on Seismologian instituutin ja St1 Oy:n välisen sopimuksen nojalla myös käytetty seismisen datan päivittäisanalyyysiin.

Taulukko 1. Helsingin seudun väliaikaisen tutkimusverkon asemien (HEL1-HEL5) ja pysyvien HelsinkiNet-asemien (KUNI, LAUT, VUOS) sijainti (WGS84).

Table 1. Locations (WGS84) of seismic stations belonging to the temporary research network (HEL1-HEL5) and permanent HelsinkiNet network (KUNI, LAUT, VUOS).

Asema	Leveysaste (°N)	Pituusaste (°E)
HEL1	60,18	24,88
HEL2	60,19	24,83
HEL3	60,17	24,82
HEL4	60,25	24,81
HEL5	60,12	24,74
LAUT	60,15	24,86
KUNI	60,27	24,91
VUOS	60,19	25,15

Seismologian instituutissa on käytössä järjestelmä seismisten tapausten automaattiseen havainnointiin, tunnistamiseen ja luokitteluun (Kortström ym. 2016). Suurin osa havaituista tapauksista on todennäköisiä louhos- tai työmaaräjäytyksiä. Niiden osalta automaattipaikannus jää useimmiten lopulliseksi paikannukseksi ja vain luokittelu tarkastetaan käsin päivittäisanalyyseissa. Suomen alueella automaattipaikannusten virhe voi olla useita kilometrejä. Siihen vaikuttaa havaintoasemien signaali-kohinasuhteen sekä maankuoren nopeusmallin lisäksi myös asemageometria, eli seismisen tapauksen sijainti suhteessa asemiin. Ihanteellisinta olisi, että havaintoasemat sijaitsisivat mahdollisimman tasaisesti eri atsimuuttisuunnissa seismisen lähteen ympärillä (atsimuuttiaukko < 90°). Valtakunnallinen kiinteä asemaverkko kykenee havaitsemaan magnitudia $M_L \sim 0,9$ suuremmat tapaukset kaikkialta Suomesta. Kynnysmagnitudi on tätä matalampi tilapäisten tutkimusasemaverkkojen kohdalla ja erikoiskohteissa kuten Pyhäjoelle kaavaillun ydinvoimalan valvontaverkon alueella (Valtonen ym. 2013).

St1:n geotermisen voimalaitoshankkeen valvonnassa Seismologian instituutti on käyttänyt erillistä automaattista havainto- ja paikannusjärjestelmää. Se perustuu valtakunnallisen verkon ohjelmistoon, mutta sitä on viritetty sopimaan paremmin heikoille läheltä asemia tuleville signaaleille. Automaattista havainnointia ja paikannusta ohjaavat parametrit on valittu siten, että verkko havaitsisi

mahdollisimman paljon maanlaajuisen verkon havaintokynnyksen alapuolelle jääviä pieniä tapauksia. Pääkaupunkiseudun automaattinen havaintojärjestelmä on käyttänyt St1:n ylläpitämiä ja instituutin väliaikaisia asemia. Sen havaintokyky on ollut Otaniemen alueella alle magnitudin 0,0, mutta järjestelmä on tuottanut myös paljon virheellisiä havaintoja ja huonosti paikannettuja tapauksia varsinkin verkon reuna-alueilta.

HelsinkiNetin asemat liitettiin heti osaksi sekä valtakunnallisen että pääkaupunkiseudun asemaverkon automaattisia havaintojärjestelmiä. Automaattisten järjestelmien tuottamien havaintojen määrä pääkaupunkiseudulla kasvoi huomattavasti vuonna 2020 verrattuna vuoteen 2019. Valtakunnallinen verkko tuotti HelsinkiNet-asemien kanssa 484 automaattitapausta 30 km:n säteellä Rautatientorista vuonna 2020. Edellisenä vuonna automaattitapauksia oli 311 eli kasvua oli n. 56 %. Vuonna 2020 tapauksista 209 alitti magnitudin 0,9. Edellisenä vuonna vastaava luku oli 93. Valtakunnallista havaintokynnystä pienempien tapausten lukumäärä kasvoi siten noin 123 %.

Pääkaupunkiseudun oman havaintojärjestelmän, joka hyödyntää myös St1:n asemia ja Seismologian instituutin väliaikaisia asemia, tuottamat tapausmäärät kasvoivat vielä enemmän. Vuonna 2020 järjestelmä tuotti kaikkiaan 6755 automaattitapausta 30 km säteellä Rautatientorista, kun edellisenä vuonna luku oli 2834. Kasvua oli n. 138 %. Vuonna 2020 tapauksista 4271 oli alle magnitudin 0,0 suuruisia. Vuonna 2019 vastaava luku oli 1223. Pienten tapausten havaintomäärä kasvoi peräti 249 %.

Edellisissä kappaleissa esitetyt tapausmäärät on laskettu täysin automaattisista, tarkistamattomista havainnoista. Ne sisältävät kaikkia mahdollisia tapaustyyppejä kuten räjäytyksiä ja mahdollisia maanjäristyksiä, mutta myös esimerkiksi paalutuksien aikaansaamia signaaleja ja häiriöiksi luokiteltavista signaaleista syntyneitä havaintoja. Lisäksi varsinkin pääkaupunkiseudun oman havaintojärjestelmän suorituskykyä tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon, että St1:n asemien ja Seismologian instituutin väliaikaisten asemien datan saatavuudessa on ollut ajoittain suuria puutteita. Järjestelmään dataa tuottavien asemien puuttuminen vaikuttaa suoraan havaintokykyyn ja tämän vaikutusta edellä esitetyissä tapausmäärissä ei ole otettu huomioon.

Yleisesti voidaan todeta, että HelsinkiNet-asemien perustaminen on parantanut huomattavasti seismisten tapausten havaitsemista pääkaupunkiseudulla. Tähän vaikuttaa ennen kaikkea se, että asemat ovat jatkuvan huollon ja ylläpidon piirissä, jolloin datakatkoja on hyvin vähän ja ne jäävät lyhyiksi. Lisäksi asemien taustakohinataso on alhainen, vaikka ne sijaitsevat kaupunkialueella.

Asemien infrastruktuuria on esitelty kuvissa 3-7. Alla on lyhyt yhteenveto HelsinkiNetin asemille kertomusvuonna suoritetuista toimenpiteistä:

VUOS

Laitteisto kalibroitiin keväällä Nurmijärvellä ennen asentamista.

Asema rekisteröitiin 14.01.2020.

Asema asennettiin akuilla toimivaksi 14.1.2020.

Asemalle saatiin sähköt ja jatkuva 4g-yhteys 20.3.2020.

Ongelmia, joista seurannut datakatkoksia: Ei.

Muita ongelmia: Jostain syystä rakennuksen sähkökeskuksen pääkatkaisija oli poissa päältä 25.3.2020. Kaupunki korjasi tilanteen 26.3.2020.



Kuva 3. Betonilaatta suojaa seismometriä VUOS-asemalla.

Figure 3. A concrete tile protects the seismometer at the VUOS station.

LAUT

Laitteisto kalibroitiin keväällä Nurmijärvellä ennen asentamista.

Asema rekisteröitiin 31.03.2020.

Aseman laitesuoja valmistui ja asema aloitti toimintansa 9.4.2020. Asema oli heti sähköistetty ja 4g-yhteys myös päällä.

Ongelmia, joista seurannut datakatkoksia: Ei.

Muita ongelmia: Kaivonkannen tiiveys osoittautui riittämättömäksi. Kaupunki toimitti asemalle uuden lisäkannen joulukuussa 2020.



Kuva 4. Kaivonrenkaan sisällä on betonilieriö, jossa seismometri. Tämä kuva on LAUT-asemalta, mutta seismometri on suojattu samalla tavalla kaikilla HelsinkiNet-asemilla.

Figure 4. Inside the well lining ring, there is a concrete cylinder with a seismometer. This photograph is from the LAUT station, yet the seismometer has been protected similarly at all the HelsinkiNet stations.

KUNI

Laitteisto kalibroitiin keväällä Nurmijärvellä ennen asentamista.

Asema rekisteröitiin 21.04.2020.

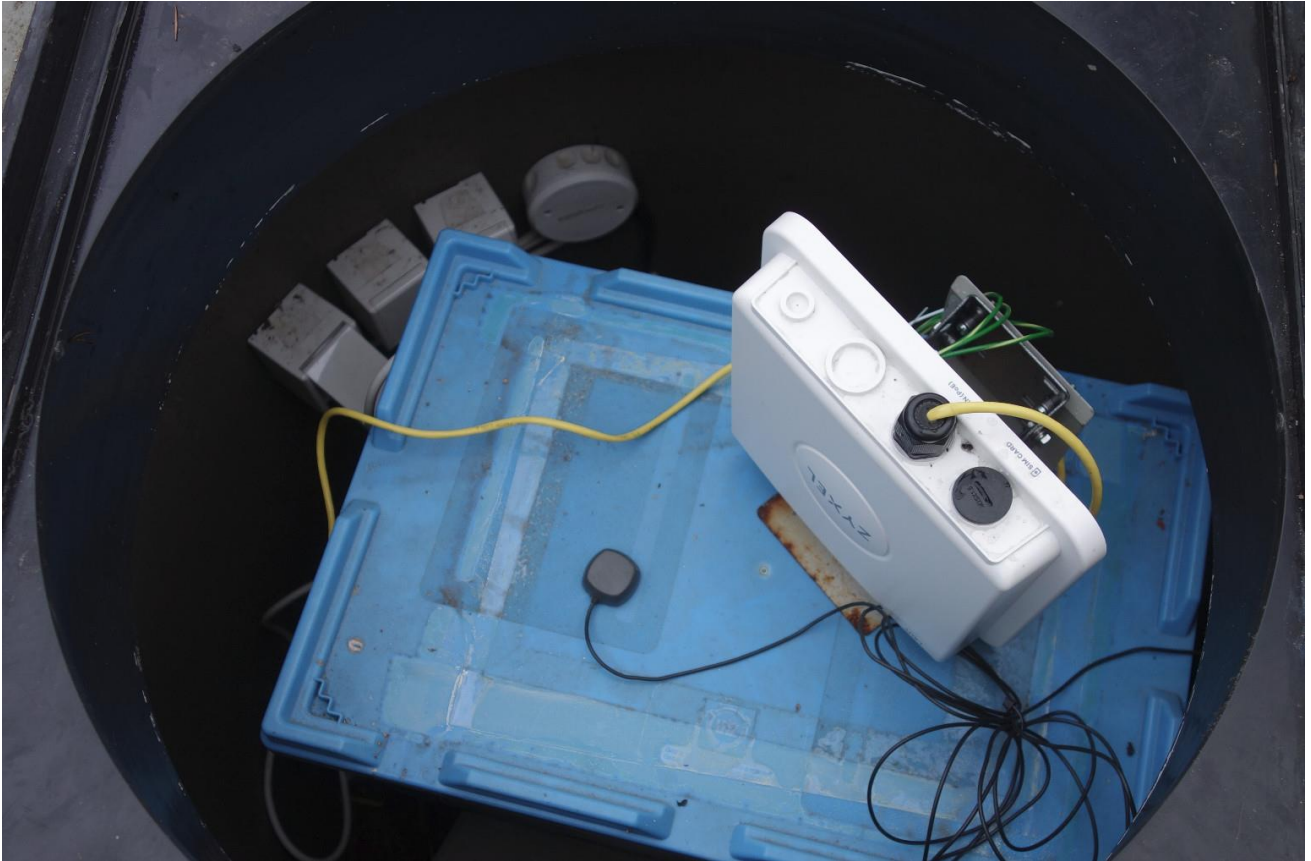
Asema asennettiin akuilla toimivaksi 21.4.2020.

Aseman laitesuoja valmistui ja asema asennettiin 24.6.2020.

Ongelmia, joista seurannut datakatkoksia: Virtalähde rikkoontui ukonilman aikaan 23.-24.8.2020. Vika havaittiin 5.9. Siihen asti asema oli toiminut akun varassa. Vika korjattiin eli uusi virtalähde vaihdettiin 8.9. Kaupunki oli hankkinut virtalähteen varalle heti projektin alussa. Datakatkos kesti noin 82 tuntia.

Muita ongelmia: Asemalle ostettu seismometri Trillium Compact s/n 7266 oli havaittu vialliseksi jo testimittauksissa Nurmijärvellä. Seismologian instituutti lähetti seismometrin huoltoon valmistajalle

Kanadaan, josta se palautui ennen joulua 2020. Varsinaista vikaa ei löytynyt, mutta laitteeseen asennettiin uusi firmware-ohjelmisto. Huolto ja testaus hoidettiin takuuhuollossa. Seismometri vaihdetaan asemalle alkuvuonna 2021. Kaivonkannen tiiveys osoittautui riittämättömäksi, joten kaupunki toimitti uuden lisäkannen joulukuussa 2020.



Kuva 5. Laatikon kannen päällä on GNSS-antenni ajastusta varten. Kaivonrengasasemilla, kuten LAUT, kannen päällä on myös 4g-modeemi.

Figure 5. There is a GNSS antenna for timing on the cover of the box. At stations within a well lining ring, such as LAUT, a 4g modem is also placed on the cover.



Kuva 6. KUNI-aseman kaivonrenkaan sisällä on erillinen taso seismometrin yläpuolella. Kosketusta maahan ei ole. Laatikko on asetettu tason päälle laitesuojaksi. Kaikki laitteet ovat kosteisiin tiloihin sopivia.

Figure 6. There is a separate level above the seismometer inside the well lining ring. There is no contact to the ground. The box has been placed on the level to protect the equipment. All the devices are durable in humid environments.



Kuva 7. Asemille LAUT ja KUNI asennettiin uusi lujitemuovinen lisäkansi, koska kannessa ollut luukku ei ollut riittävän tiivis. Kuvassa on KUNI-asema.

Figure 7. For stations LAUT and KUNI, a reinforced plastic cover was installed, because the hatch in the cover was not tight enough. The photograph shows the KUNI station.

3. Havainnot maanjärityksistä vuonna 2020

3.1. Instrumentaaliset havainnot

Seismologian instituutti havaitsi vuonna 2020 yhteensä 484 seismistä tapausta Helsingissä ja lähialueella enintään 30 km:n etäisyydellä Rautatientorista. Suurin osa tapauksista oli työmaa- tai louhosräjäytyksiä, mutta lisäksi rekisteröitiin muiden muassa paalutuksen aiheuttamia signaaleja lähellä työmaita sijaitsevilla seismisillä asemilla. Pääkaupunkiseudulta rekisteröitiin kolme luonnollista maanjäritystä. Kaksi maanjärityksistä havaittiin Vantaalla Hakunilassa lähellä Helsingin rajaa. Ensimmäinen tapahtui 22. heinäkuuta vastaisena yönä ja toinen (Kuva 8) illalla 12. joulukuuta. Molempien magnitudi oli 0,7. Vantaan seismisiä tapauksia selvästi heikompi magnitudin $-0,5$ maanjäritys mitattiin Espoossa 3. maaliskuuta iltapäivällä.

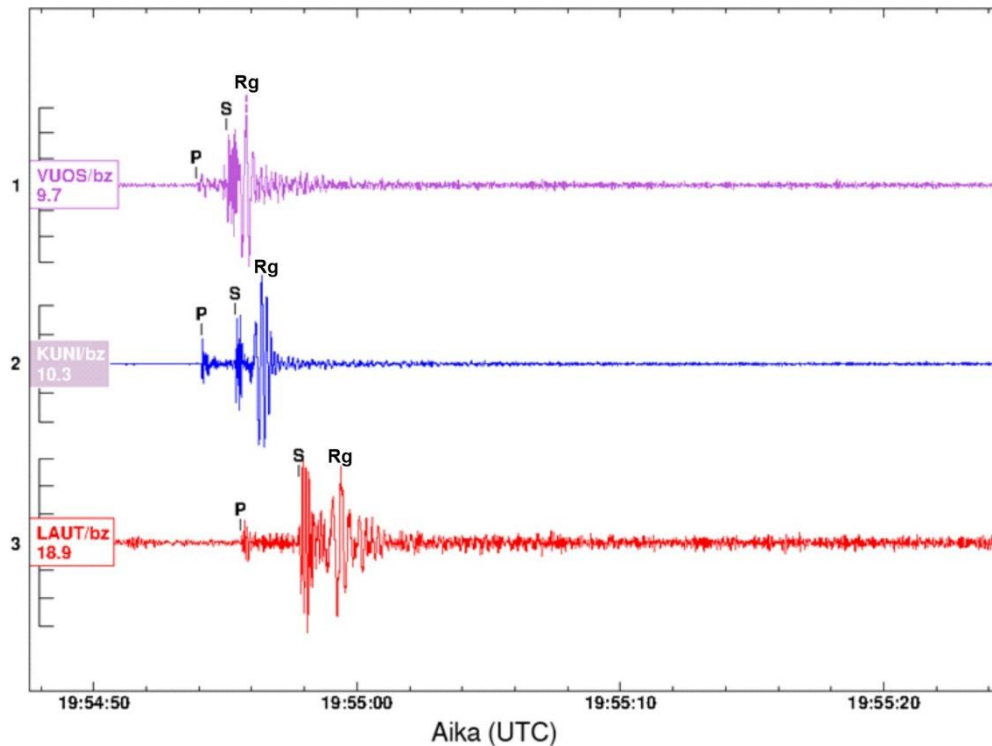
Vantaan Hakunilan maanjäritys heinäkuussa tapahtui alle 1 km:n syvyydellä vanhan siirroslinjan tuntumassa. Kyseessä oli Vantaan mittaushistorian ensimmäinen maanjäritys. Sen havaitsivat myös muutamat alueen asukkaat. HelsinkiNet-asemat olivat hyvin tärkeitä tapauksen havaitsemisessa ja paikantamisessa: aiemmin alle magnitudin 1,0 maanjärityksiä oli vaikea havaita pääkaupunkiseudulla, koska seismisiä asemia oli niin harvassa. Hakunilan maanjäritys erottui hyvin kaikilla Seismologian instituutin pääkaupunkiseudun asemilla. Lähimmät asemat olivat HelsinkiNet-asemat VUOS Kallahdessa ja KUNI Kuninkaantammessa 9 ja 10 km:n etäisyydellä. Järitys rekisteröitiin jopa Ylistaron asemalla 335 km:n päässä. Joulukuussa tapahtunut järitys paikannettiin myös alle 1 km:n syvyyteen vain muutaman sadan metrin päähän heinäkuun järityksestä.

Hyvin heikko luonnollinen maanjäritys tapahtui Espoon Laajarannassa 3. maaliskuuta. Sen voimakkuus oli $-0,5$, joten sen havaitsemisen mahdollisti ainoastaan alueen tiheä asemaverkko. Järityksen keskus sijaitsi noin kilometrin syvyydessä alueella, jossa kaksi siirroslinjaa risteää. Niistä toinen, luode-kaakko-suuntainen siirros liittyy mahdollisesti ST1:n lämpövarantoa halkovaan, stimuloitien kohteena olleeseen siirrosvyöhykkeeseen (Kwiatek ym. 2019; Hillers ym. 2020). Samalla alueella on havaittu magnitudin 1,7 ja 1,4 maanjäritykset helmikuussa 2013. Lähimpien asemien rekisteröinneissä näkyvän voimakkaan Rg-aallon perusteella nämäkin tapaukset sattuivat lähellä maanpintaa.

Otaniemen lämpövoimahankkeessa suoritettiin vastastimulaatio 6.–24. toukokuuta 2020. Stimulaation aikana havaittiin Seismologian instituutin käytössä olevilla asemilla 64 seismistä tapausta, jotka vahvistettiin päivittäisanalyysissa Otaniemen hankkeeseen liittyviksi indusoiduiksi maanjärityksiksi. Niiden voimakkuudet vaihtelivat $-1,0$:stä $1,2$:een. Niistä on kerrottu yksityiskohtaisesti raportissa, joka esittelee seismisyyttä syväreikähankkeen viimeistelyvaiheessa tammi-syyskuussa 2020 (Veikkolainen ym. 2020).

Indusoitunutta seismisyyttä ilmeni Otaniemessä myös muulloin kuin stimuloinnin aikana. Huhtikuun 14. päivänä havaittiin kaksi indusoitua järitystä, joiden voimakkuudet olivat 1,2 ja 0,6. Stimulaation jälkeen toukokuun lopulla ja kesäkuussa havaittiin muutama hieman voimakkaampi indusoitu maanjäritys, voimakkuuksiltaan 0,8–0,9. Joitakin nollan suuruusluokkaa olevia tai vieläkin pienempiä

tapauksia havaittiin aina joulukuun loppuun asti. 1.12. ja 8.12. havaittiin indusoituneet maanjäristykset, jotka kummatkin olivat magnitudiltaan 0,5. Yhteensä Seismologian instituutin havaintojärjestelmä rekisteröi vuonna 2020 Otaniemen alueelta 21 indusoitua maanjäristystä, joiden voimakkuus oli vähintään 0,0.



Kuva 8. Hakunilan maanjäristyksen (12.12.2020 21:54:52.5 Suomen aikaa) aiheuttama pystysuora maanliike HelsinkiNetin asemilla. P- ja S-aalto sekä pinta-aalto (Rg) on merkitty seismogrammeihin. Voimakas Rg esiintyy vain lähellä maanpintaa tapahtuvien järistysten rekisteröinneissä.

Figure 8. The vertical ground motion of the earthquake of Hakunila, Vantaa (12 December 2020 at 21:54:52.5 local time) observed at HelsinkiNet stations. Direct P and S waves and surface wave (Rg) are shown in the seismograms. A strong Rg only exists in registrations of earthquakes which occur near the ground surface. The horizontal axis shows time in UTC.

Espoossa tapahtui voimakkuudeltaan 0,0:n kokoinen järistys maanantaina 30.11. klo 17:56 ja magnitudin 1,1:n järistys keskiviikkona 2.12. klo 08:47. Molemmat paikannettiin Koskelossa sijaitsevan keskisyvän geolämpölaitoksen välittömään läheisyyteen 1,3-1,6 km:n syvyydelle ja luokiteltiin indusoiduiksi. Rg-aallon amplitudeihin (Kuva 8) perustuva syvyysarvio oli 0,5-1,5 km. Lähellä kulkee myös Mäntsälä-Porkkala-ruhjevyöhyke. Laitoksen lämpökaivo hukkas vettä tasaisesti 0,09 l/s eli noin 8m³/vrk (Rami Niemi, henkilökohtainen tiedonanto 5.2.2021).

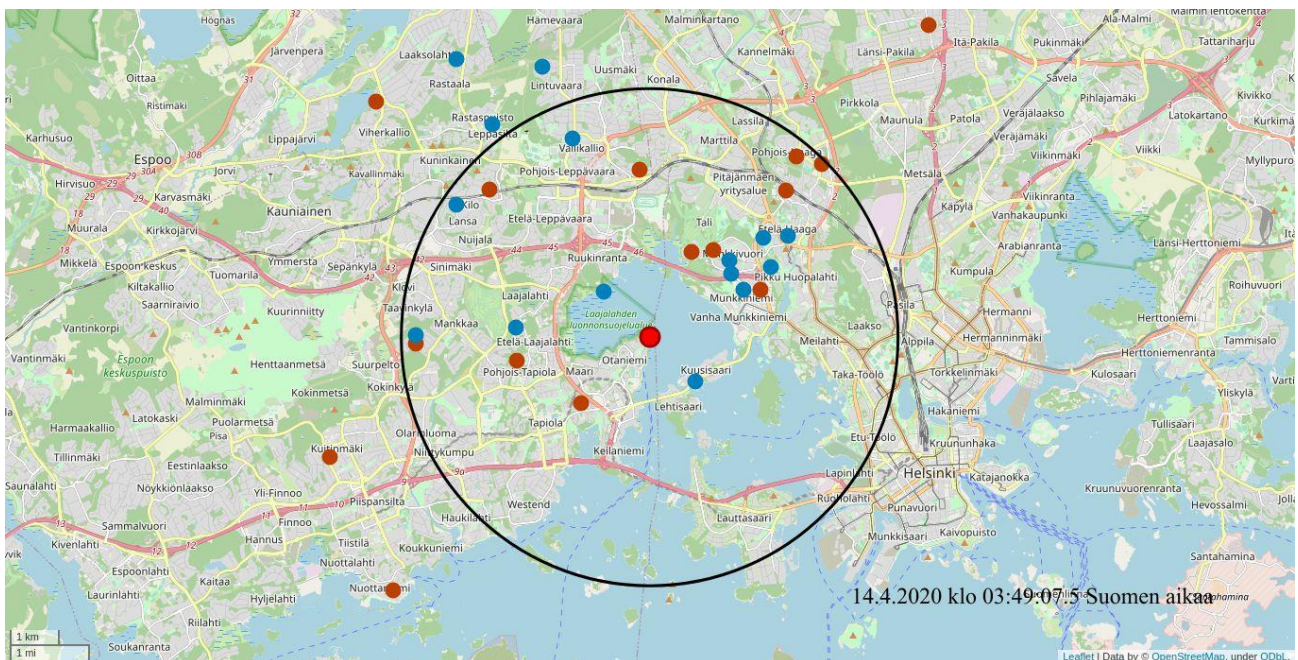
Koskelon järistysten paikannuksessa Seismologian instituutin väliaikaisella pääkaupunkiseudun verkolla oli merkittävä rooli. Lähin asema HEL4 oli Lintuvaarassa 5 km:n etäisyydellä, ja HelsinkiNetin

asemista lähin oli KUNI 10 km:n päässä. Voimakkaampi järityksistä havaittiin hyvin sekä valtakunnallisen että pääkaupunkiseudun verkon automaattisella havaintojärjestelmällä, mutta pienempi vain pääkaupunkiseudun järjestelmällä.

Sekä Hakunilan että Koskelon tapaukset sattuivat paikallisen asemaverkon reunalla. Tämä kasvattaa paikannuksen ja etenkin siirrostasoratkaisujen virherajoja. Ihanteellisinta olisi, että seismiset asemat sijaitsisivat mahdollisimman tasaisesti eri atsimuuttisuunnissa maanjärityksestä katsoen.

3.2. Makroseismiset havainnot

Seismologian instituuttiin voi lähettää makroseismisiä havaintoja sen verkkosivulta löytyvällä kyselylomakkeella (<https://elomake.helsinki.fi/lomakkeet/89816/lomake.html>). Lomake on saatavilla suomen lisäksi ruotsin ja englannin kielellä.



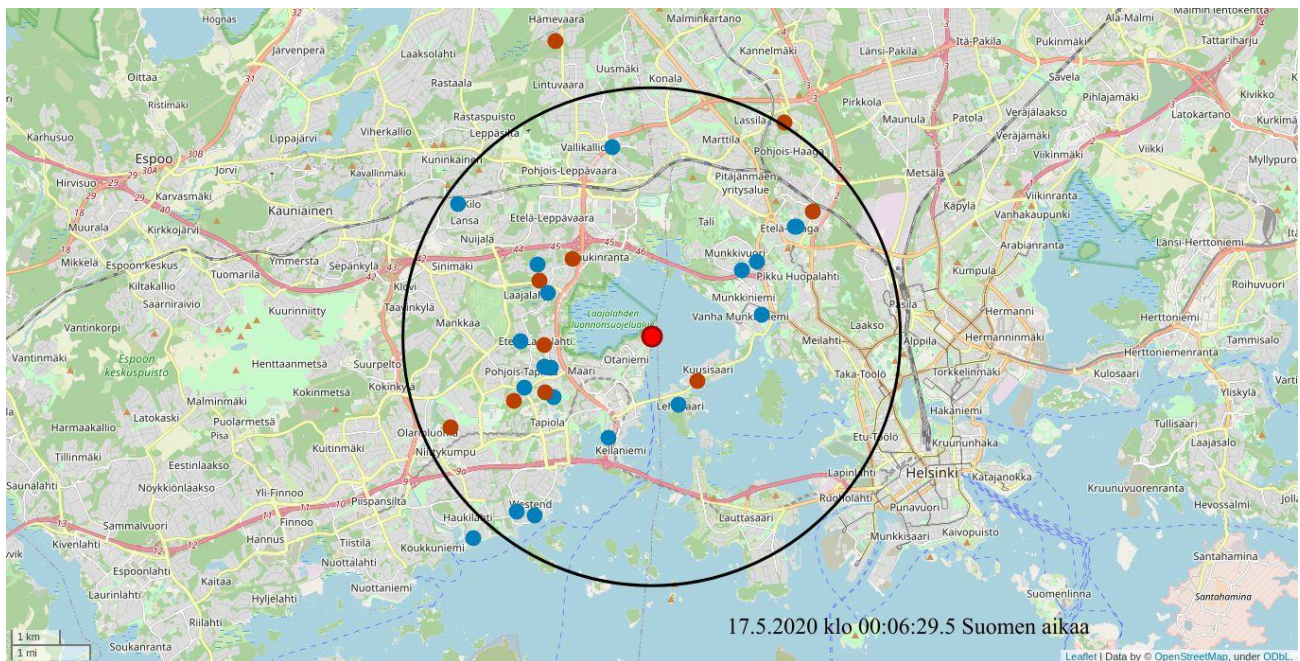
Kuva 9. Otaniemen indusoidusta maanjärityksestä 14. huhtikuuta kertyneet kansalaisilmoitukset. Siniset täplät merkitsevät tärinä- ja äänihavaintoa, punaiset äänihavaintoa. Kirkkaanpunainen täplä on järjestyskeskus, ja musta rengas kulkee 5 km:n etäisyydellä siitä.

Figure 9. The macroseismic observations related to the induced earthquake in Otaniemi on 14 April. The blue dots show sites of reported tremor and sound, and the red dots sites of sound observations. The bright red dot denotes the earthquake epicenter, and the black circle encompasses it at a radius of 5 km.

Kertomusvuonna valtaosa pääkaupunkiseudulta saaduista havaintoilmoituksista liittyi Otaniemen lämpövoimalahankkeeseen (Liite 1.1). Tiistaina 14. huhtikuuta kello 3:49 paikallista aikaa sattuneesta magnitudin 1,2 indusoidusta järityksestä saatiin havaintoilmoitus 28 yksilöidystä osoitteesta

(kadunnimi ja -numero), kahdelta nimetyltä kadulta, kahdesta kaupunginosasta (Töölö ja Munkkiniemi) ja yhdestä nimetystä kaupungista (Espoo). Osoitteet sijoittuvat Helsinkiin ja Espooseen (kuva 9) ja olivat osin samoja kuin vuoden 2018 stimulaation aikana. Lähes kaikki havaitsijat heräsivät ilmiöön. Runsas puolet havaitsijoista luonnehti ilmiötä lähinnä ääneksi kuten ukkoseksi tai pamaukseksi, mutta loput kokivat tunteneensa myös tärinää. Lähimmät havainnot tehtiin 1–2 km:n ja niiden valtaosa 2–4 km:n etäisyydellä. Ilmiötä huomattiin paikoin myös yli 5 km:n päässä järjestyskeskuksesta.

Vastastimuloinnin aikana 12. toukokuuta pian aamukahdeksan jälkeen sattui jonkin verran huomiota herättänyt indusoitu järistys, jonka voimakkuus oli 1,0. Kaukaisimmat havainnot lähetettiin alle 5 km:n etäisyydeltä. Viisi seitsemästä raportijasta koki ilmiön tärinänä. Varsinainen järistysrykelmä osui sunnuntaille 17. toukokuuta, jonka aikana havaintoilmoituksia kertyi neljästä eri järistyksestä. Ensimmäinen oli voimakkain, 1,2, ja siitä lähetti ilmoituksen yli 30 havaitsijaa (kuva 10). Se sattui pian puolenyön jälkeen. Valtaosa havaitsijoista oli valveilla paikallaan 2–4 km:n päässä järjestyskeskuksesta. Runsas 60 % heistä ilmoitti tapauksen tärinänä ja äänenä, loput pelkästään äänenä.

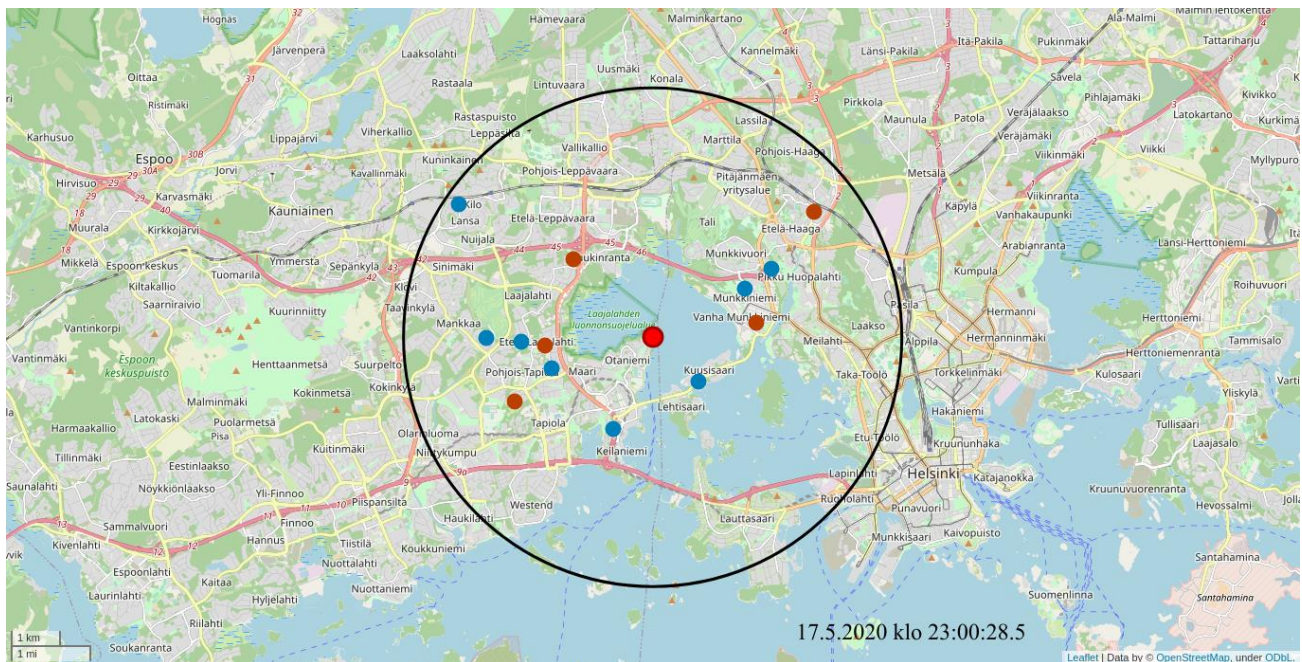


Kuva 10. Otaniemen indusoidusta maanjäristyksestä 17. toukokuuta pian puolenyön jälkeen kertyneet kansalaisilmoitukset. Siniset täplät merkitsevät tärinä- ja äänihavaintoa, punaiset äänihavaintoa. Kirkkaanpunainen täplä on järjestyskeskus, ja musta rengas on piirretty 5 km:n etäisyydelle siitä.

Figure 10. The macroseismic observations related to the induced earthquake in Otaniemi on 17 May shortly after midnight. The blue dots show sites of reported tremor and sound, and the red dots sites of sound observations. The bright red dot denotes the earthquake epicenter, and the black circle encompasses it at a radius of 5 km.

Hieman pienempi magnitudin 1,1 järistys sattui ennen viittä iltapäivällä, mutta illalla klo 23:00 (voimakkuus 0,9) ja 23:07 (0,5) sattuneet järistykset keräsivät enemmän havaintoja luultavasti hiljaisen ajankohdan vuoksi. Kello 23 sattuneen järistykseen havaintojen alueellinen jakauma on samankaltainen kuin aikaisemmin (kuva 11).

Sunnuntaina 17. toukokuuta usea havaitsija ilmoitti ainakin kahdesta eri tapauksesta, ja jotkut heistä mainitsivat Otaniemen lämpövoimalan. Arvattavasti se kertoo jonkinasteisesta tottumisesta ilmiöihin ja/tai St1-yhtiön tiedotuksesta, joka oli laajempaa kuin vuonna 2018.



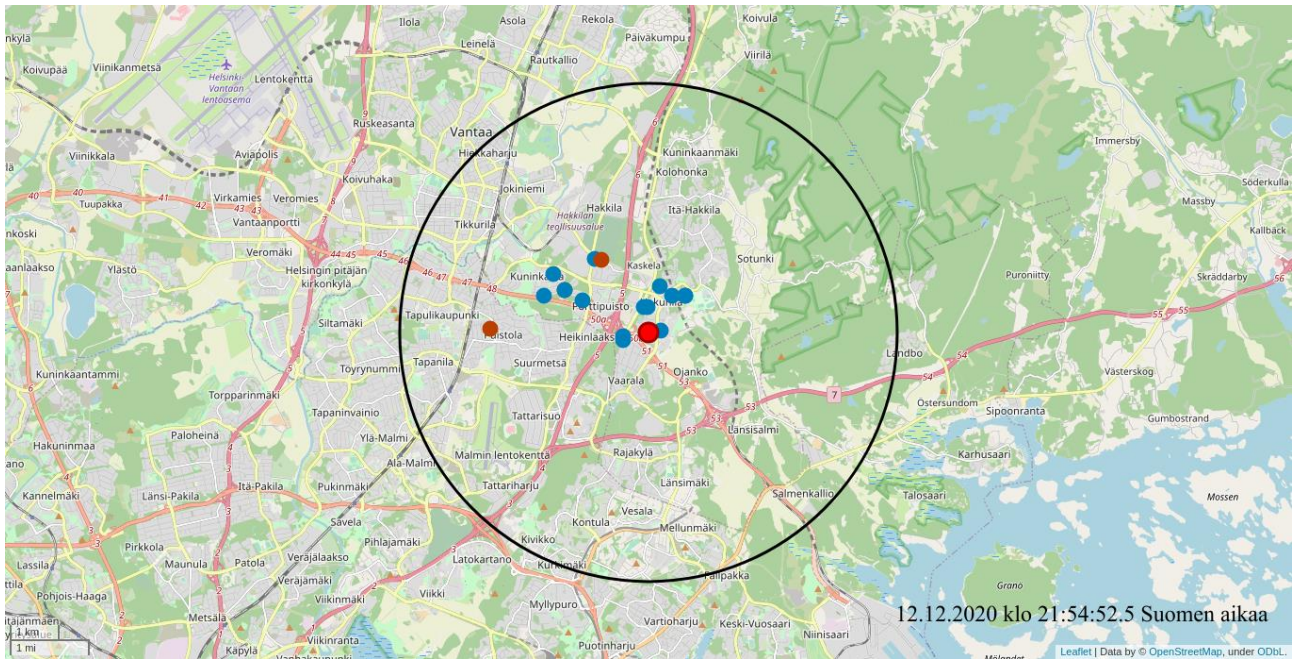
Kuva 11. Otaniemen indusoidusta maanjärityksestä 17. toukokuuta klo 23 kertyneet kansalaisilmoitukset. Siniset täplät merkitsevät värinä- ja äänihavaintoa, punaiset äänihavaintoa. Kirkkaanpunainen täplä on järistyskeskus, ja musta rengas on piirretty 5 km:n etäisyydelle siitä.

Figure 11. The macroseismic observations related to the induced earthquake in Otaniemi at 11 pm on 17 May. The blue dots show sites of reported tremor and sound, and the red dots sites of sound observations. The bright red dot denotes the earthquake epicenter, and the black circle encompasses it at a radius of 5 km.

Lisäksi Seismologian instituutti sai yksittäisen kansalaishavainnon Espoon Koskelossa sijaitsevan lämpövoimalaitoksen aiheuttamasta indusoidusta maanjärityksestä 2. joulukuuta ja toisen vähäisemmästä järityksestä 30. marraskuuta. Paikka Kehä III:n vieressä ei ole ihanteellinen aistihavaintojen tekemiseen.

Luonnollisiin maanjärityksiin liittyviä makroseismisiä havaintoja kertyi eniten Vantaalta. Lauantai-iltana 12. joulukuuta sieltä rekisteröitiin vuoden toinen maanjäritys alle puolen kilometrin päässä

heinäkuun tapauksesta. Se oli voimakkuudeltaan ainoastaan 0,7 mutta sen ajanhetki hieman ennen iltakymmentä oli otollinen aistihavainnoille. Instituutti sai tapauksesta havaintoilmoituksen 17 eri osoitteesta, yhden Helsingistä ja loput Vantaalta. Helsingin-havainto tuli yli 3 km:n ja kaksi havaintoa Vantaalta yli 2 km:n etäisyydeltä järjestyskeskuksesta, mutta kahdeksan huomiota oli tehty joidenkin satojen metrien päässä (kuva 12). Havaittua ääntä kuvattiin räjähdysten kaltaisena, pamauksena, kumauksena, mutta joidenkin havainto oli pikemmin tärinää, ”kaikki tärähti.” Ilmiö oli lyhytkestoinen, yleinen arvio oli sekunnin tai pari. Kaikki havaitsijat olivat valveilla paikallaan.



Kuva 12. Hakunilan maanjäristyksestä 12. joulukuuta kertyneet kansalaisilmoitukset. Siniset täplät merkitsevät tärinä- ja äänihavaintoa, punaiset äänihavaintoa. Isoin punainen täplä on järjestyskeskus, ja musta rengas on piirretty 5 km:n etäisyydelle siitä.

Figure 12. The macroseismic observations related to the Hakunila, Vantaa earthquake on 12 December. The blue dots show sites of reported tremor and sound, and the red dots sites of sound observations. The largest red dot denotes the earthquake epicenter, and the black circle encompasses it at a radius of 5 km.

Muutamassa havaintoraportissa viitattiin lisäksi Hakunilan maanjäristykseen 22. heinäkuuta. Tuolloin instituuttiin saapui vain muutama makrohavainto, mutta nyt mainittiin, että myös heinäkuussa tapaus huomattiin paikoin aika yleisesti. Jotkut pääkaupunkiseudun asukkaat havaitsivat vuoden aikana kaksi luonnollista maanjäristystä!

4. Siirrostasoratkaisut

Taulukossa 2 ja Kuvassa 13 on esitetty Hakunilan joulukuisen järistysten, Koskelon pääjäristysten sekä suurimman ST1:n vastastimuloinnin aikaisen indusoidun tapauksen (Veikkolainen ym. 2020) siirrostasoratkaisut. Lisätietoa siirrostasoratkaisujen määrittämisestä on saatavilla Liitteessä 1.2.

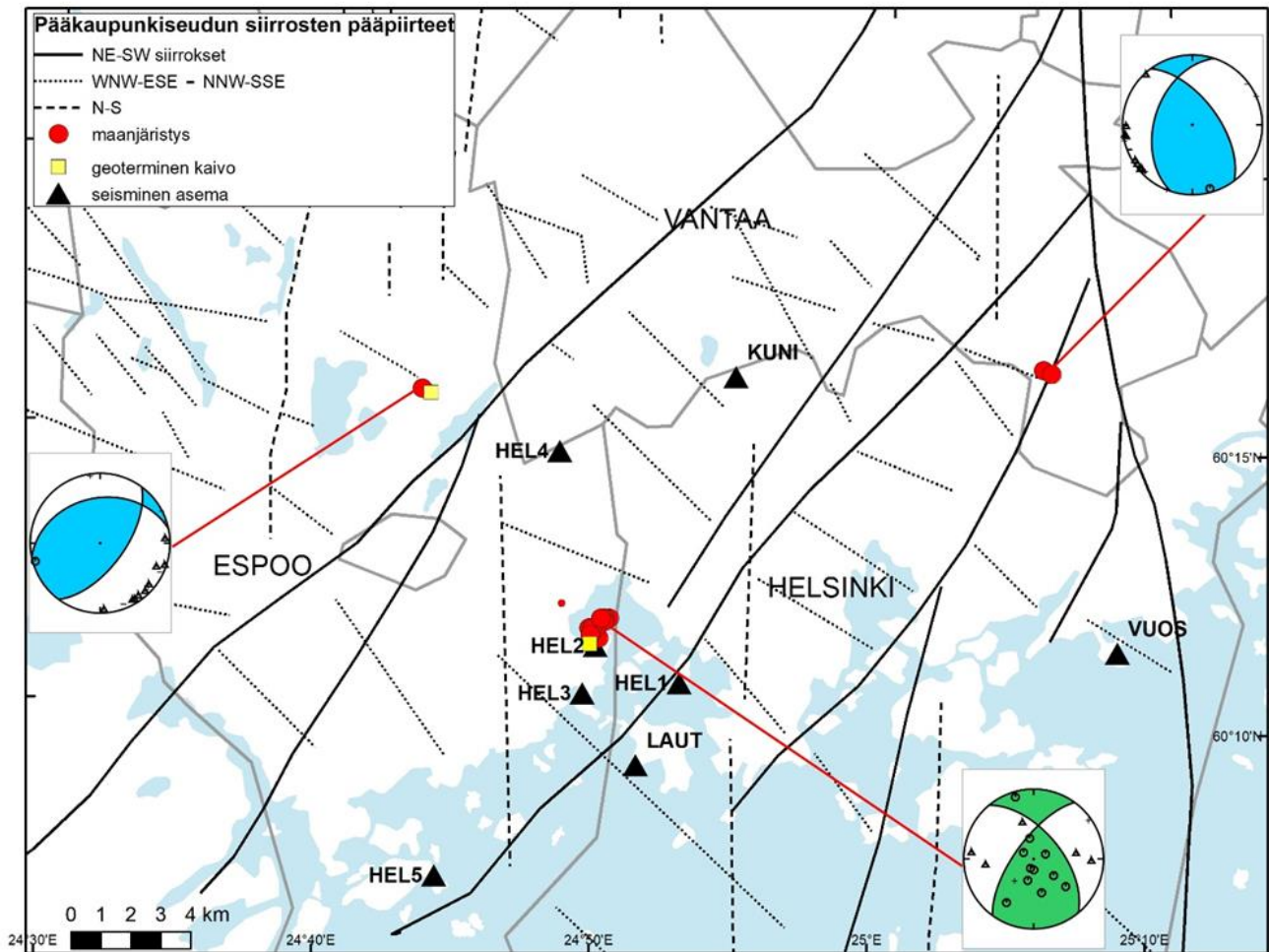
Taulukko 2. Koskelon ja Hakunilan järistysten sekä suurimman Otaniemen indusoidun maanjäristyksen siirrostasoratkaisut. Tapahtuma-aika on Suomen aikaa. Määrittämisessä käytettyjen asemien lukumäärä (Nas) ja niiden välinen suurin atsimuuttiaukko (Fag), siirrostasoratkaisun kulmat (kulku, kaade, liuku) pää/apusiirrostasolle sekä puristus (P) ja venytys (T) –akselien suunnat (suuntakulma/kallistuskulma).

Table 2. Focal mechanism for the Koskelo and Hakunila earthquakes and the strongest induced earthquake in Otaniemi. Origin time is Finnish time. Number of stations used in determination (Nas), the maximum azimuthal gap between the stations (Fag), strike (kulku), dip (kaade) and rake (liuku) angles of the main/auxiliary nodal planes, and pressure (P) and tension (T) poles (azimuth/plunge).

Paikka	Tapahtuma -aika	Nas	Fag (°)	Kulku (°)	Kaade (°)	Liuku (°)	P (°)	T (°)
Otaniemi	14.04.2020 03:49:08	16	78	140 / 36	58 / 68	26 / 146	90 / 6	355 / 39
Koskelo	02.12.2020 08:47:05	10	192	216 / 78	62 / 36	67 / 126	323 / 14	86 / 65
Hakunila	12.12.2020 21:54:53	10	111	143 / 18	60 / 45	55 / 135	258 / 9	2 / 59

Koskelon järistykset paikantuivat kuoren yläosaan 0,5–1,5 km:n syvyydelle. Pääjäristysten siirrostasoratkaisu kuvaa vinoa käänteissiirrosta. Kahdesta mahdollisesta siirrostasosta koillis-lounais-suuntainen siirrostaso on rakennegeologisten havaintojen perusteella todennäköisempi. Helsingin alueen siirroskartalla (Kuva 13) nähdään merkittävä koillis-lounais-suuntainen Mäntsälä-Porkkala-siirros (Elminen ym. 2018), joka kulkee Pitkäjärven rantaviivaa pitkin noin 1,5 km:n etäisyydellä tapauksen episentristä. Järitys sattui todennäköisesti tähän laajaan siirrosvyöhykkeeseen liittyvässä pienemmässä siirroksessa. Korjan ym. (2019) mukaan koillis-lounais-suuntaiset siirroksot myös aktivoituvat herkimmin käänteissiirroksina maankuoren nykyisen jännityskentän vaikutuksesta. Lähdealueella toimii energiayhtiö Qheatin 1,3 km syvä lämpökaivo (keltainen neliö Kuvassa 13). Kaivon porauksen aikana on osuttu ruhjeeseen 0,7:n ja 1,3 km:n syvyydellä, ja näistä matalamman ruhjeen on havaittu vuotavan (Rami Niemi, henkilökohtainen tiedonanto 11.12.2020). Tarkemman

rakennetiedon puuttuessa ei voida varmistaa, liittyvätkö Koskelon järjestykset juuri näihin lämpökaivoa leikkaaviin ruhjeisiin.



Kuva 13: Vuoden 2020 luonnolliset ja indusoidut järjestykset sekä Taulukon 2 siirrostasoratkaisut pääkaupunkiseudun siirroskartalla. Sivuttaissiirros on väritetty vihreällä ja käänteissiirros sinisellä. Fokuspallolla (yläpalloprojektio) analyysissä käytettyjen asemien P-aallon polariteetti: kuusikulmio/+ on varma/epävarma ylös, kolmio/- varma/epävarma alas. Siirrosten pääpiirteet muokattu Elminen ym. (2018) Kuvan 10 pohjalta.

Figure 13: Natural and induced earthquakes of 2020 and focal mechanisms of Table 2 on a fault map of the Helsinki metropolitan area. Strike-slip is shown by green and reverse by blue beach balls. On focal sphere (upper hemisphere projection) P-wave polarity of the stations providing data: hexagon/+ is certain/uncertain up, triangle/- certain/uncertain down. Major features of the faults modified after Figure 10 in Elminen et al. (2018). Legend: Main features of faults in the Helsinki region (Pääkaupunkiseudun siirrosten pääpiirteet), NE-SW faults (NE-SW-siirrokset), earthquake (maanjäritys), geothermal well (geoterminen kaivo), and seismic station (seisminen asema).

Hakunilan järjestykset sattuiivat myös kuoren yläosassa noin kilometrin syvyydellä. Joulukuun järjestykselle laskettu siirrostasoratkaisu on samantyyppinen vino käänteissiirros kuin Koskelon

tapauksessa. Lähdealuetta halkoo toinen pääkaupunkiseudun merkittävistä siirrosvyöhykkeistä - Vuosaari-Korso –siirros (Elminen ym. 2018). Järitys on todennäköisesti tapahtunut pohjoiskoillis-etelälounais-suuntaisessa siirroksessa, joka liittyy tähän siirrosverkostoon.

Siirrostasoratkaisut perustuvat varmoihin polariteettihavaintoihin sekä järityksen säteilykaaviota ilmentäviin P- ja S-aallon amplitudisuhteisiin, jotka on mitattu HelsinkiNetin, HEL- ja St1- asemien sekä kansallisen verkon kolmen lähimmän aseman rekisteröinneistä. Koskelon ja Hakunilan järityksille saadut ratkaisujoukot eivät olleet yksikäsitteisiä, sillä tapaukset sijaitsevat asemaverkon reuna-alueilla. Luotettava siirrostasoratkaisu edellyttää, että käytetyt asemat ovat niin atsimuutin kuin etäisyydenkin suhteen tasaisesti jakautuneet järityslähteen ympärille. Kuvassa 13 on havainnollistettu asemien sijaintia järityskeskuksen (fokuspallon keskuksessa) suhteen. Otaniemen indusoitu järitys 6 km:n syvyydellä ja keskellä asemaverkkoa on esimerkki luotettavasta ratkaisusta.

Lähdeluettelo

- Elminen, T., H. Zwingmann ja A. Kaakinen, 2018. Constraining the timing of brittle deformation and sedimentation in southern Finland: Implications for Neoproterozoic evolution of the eastern Fennoscandian shield. *Precambrian Research* 304: 110–124.
- Hillers, G., T.A.T. Vuorinen, M.R. Uski, J.T. Kortström, P.B. Mäntyniemi, T. Tiira, P.E. Malin ja T. Saarno, 2020. The 2018 geothermal reservoir stimulation in Espoo/Helsinki, southern Finland: Seismic network anatomy and data features. *Seismological Research Letters* 91: 770–786.
- Korja, A., S. Kihlman ja K. Oinonen (toim.), 2019. Seismic source areas for seismic hazard assessment in central Fennoscandia. Helsingin yliopisto, Seismologian instituutti, raportti S-66, 228 s.
- Kortström, J., M. Uski ja T. Tiira, 2016. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences* 87: 22–30.
- Kortström, J., M. Uski ja K. Oinonen, 2018. The Finnish National Seismic Network. *Summ. Bull. Internatl. Seismol. Cent.*, January-June 2015, 52 (I), s. 41–52, Thatcham, Iso-Britannia.
- Kwiatek, G., T. Saarno, T. Ader, F. Bluemle, M. Bohnhoff, M. Chendorain, G. Dresen, P. Heikkinen, I. Kukkonen, P. Leary, M. Leonhardt, P. Malin, P. Martínez-Garzón, K. Passmore, P. Passmore, S. Valenzuela ja C. Wollin, 2019. Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland, *Science Advances* 5: eaav7224.
- Luhta, T., P. Mäntyniemi, T. Vuorinen, P. Lindblom, P. Seipäjäarvi, K. Oinonen, J. Kortström ja T. Tiira, 2020. Helsingin seisminen asemaverkko ja seismisyys 2019. Helsingin yliopisto, Seismologian instituutti, raportti T-101, 22 s.
- Niemi, R., henkilökohtaiset tiedonannot, 11.12.2020 ja 5.2.2021.
- Valtonen, O., M. Uski, A. Korja, T. Tiira ja J. Kortström, 2013. Optimal configuration of a micro-earthquake network. *Advances in Geosciences* 34: 33–36.
- Veikkolainen, T., M. Uski, A. Voutilainen, T. Vuorinen, J. Kortström, K. Oinonen, T. Luhta, P. Mäntyniemi ja T. Tiira, 2020. Seismisyys Espoon Otaniemen syväreikähankkeen viimeistelyvaiheessa. Helsingin yliopisto, Seismologian instituutti, raportti T-102.

Liite 1. Vuoden 2020 seismisten tapausten analyysi

Liite 1.1. Luonnolliset ja indusoidut maanjäristykset ($M_L \geq 0.0$) Helsingissä ja lähialueella vuonna 2020

Tyyppien selitys: LI = indusoitu maanjäristys, LQ = luonnollinen maanjäristys.

Mukana olevien tapausten etäisyys Helsingin Rautatientorista on enintään 30 km.

Tapahtuma-aika (UTC)	Tapahtuma-aika (Suomen aikaa)	Leveysaste (°N)	Pituusaste (°E)	Magnitudi (LHEL)	Tuntuvuushavaintojen lukumäärä	Tyyppi
14.04. 00:49:07.5	14.04. 03:49:07.5	60,196	24,837	1,2	34	LI
14.04. 02:32:28.0	14.04. 05:32:28.0	60,195	24,836	0,6	4	LI
12.05. 05:05:22.9	12.05. 08:05:22.9	60,194	24,833	1,0	7	LI
12.05. 08:22:47.6	12.05. 11:22:47.6	60,196	24,837	0,9	1	LI
14.05. 03:05:06.8	14.05. 06:05:06.8	60,196	24,836	0,0	0	LI
14.05. 04:23:25.5	14.05. 07:23:25.5	60,196	24,837	0,4	0	LI
16.05. 04:30:25.5	16.05. 07:30:25.5	60,197	24,836	0,4	0	LI
16.05. 21:06:29.5	17.05. 00:06:29.5	60,197	24,836	1,2	32	LI
17.05. 13:38:43.6	17.05. 16:38:43.6	60,195	24,835	1,1	4	LI
17.05. 20:00:28.5	17.05. 23:00:28.5	60,194	24,834	0,9	16	LI
17.05. 20:07:05.1	17.05. 23:07:05.1	60,195	24,833	0,5	3	LI

17.05. 22:02:20.5	18.05. 01:02:20.5	60,195	24,837	0,2	1	LI
20.05. 21:04:00.2	21.05. 00:04:00.2	60,196	24,833	0,4	1	LI
20.05. 22:20:46.2	21.05. 01:20:46.2	60,196	24,836	0,3	1	LI
22.05. 00:15:30.9	22.05. 03:15:30.9	60,196	24,836	0,3	0	LI
22.05. 16:50:51.7	22.05. 19:50:51.7	60,196	24,836	0,8	0	LI
31.05. 17:17:25.8	31.05. 20:17:25.8	60,196	24,835	0,9	1	LI
27.06. 04:51:59.4	27.06. 07:51:59.4	60,196	24,836	0,8	0	LI
22.07. 00:35:57.1	22.07. 03:35:57.1	60,274	25,096	0,8	4	LQ
30.11. 15:56:37.2	30.11. 17:56:37.2	60,263	24,728	0,0	0	LI
01.12. 16:50:43.8	01.12. 18:50:43.8	60,196	24,836	0,5	0	LI
02.12. 06:47:05.2	02.12. 08:47:05.2	60,263	24,722	1,1	1	LI
08.12. 12:17:21.1	08.12. 14:17:21.1	60,196	24,835	0,5	0	LI
12.12. 19:54:52.5	12.12. 21:54:52.5	60,273	25,101	0,7	17	LQ

Liite 1.2. Siirrostasoratkaisujen määrittämisestä

Maanjäristyksen siirrostasoratkaisun avulla pyritään selvittämään maankuoren jännityskenttää ja sitä kautta maanjäristyksen syntyyn vaikuttavia tekijöitä. Siirrostasoratkaisussa määritetään järistyksessä liikahtaneen siirroksen kulku (strike) ja kaade (dip) sekä liu'un suunta siirrostasolla eli kallistuskulma (rake). Kulku ilmoitetaan asteina pohjoisesta itäänpäin siten, että kulun suuntaan katsottaessa siirrostaso kaatuu oikealle. Kaade on välillä $0-90^\circ$ vaakatasosta mitattuna. Siirros on ns. normaalsiirros (normal), jos siirroksen yläpuolinen lohko liukuu alaspäin. Kallistuskulma on tällöin negatiivinen. Jos siirroksen yläpuolinen lohko liukuu ylöspäin, siirros on kaateesta riippuen joko käänteis- (reverse, kaade $\geq 45^\circ$) tai työntösiirros (thrust, kaade $< 45^\circ$) ja kallistuskulma positiivinen. Suomessa tyypillisiä ovat sivuttaissiirrokset (strike-slip), joissa jyrkässä siirroksessa lohkot liukuvat toistensa suhteen lähes vaakatasossa. Lisäksi on olemassa sivuttaissiirroksen erityismuoto, transformisiirros (transform), jossa täysin pystysuorassa siirroksessa lohkot liikkuvat vaakatasossa.

Pienten järistysten siirrostasoratkaisut perustuvat yleensä **ensimmäisen P-aallon liikesuuntaan** eli **polariteettiin**. Ylöspäin alkava liike rekisteröintiaseman pystysuorassa komponentissa kertoo puristuksesta, ts. maa on liikkunut asemaa kohti. Alaspäin alkava liike taas kertoo venytyksestä, ts. liike on ollut asemalta poispäin. Polariteettihavainto merkitään varmaksi, jos ensimmäinen P-aalto erottuu selkeästi taustakohinasta ja sen liikesuunnan pystyy määrittämään varmasti. Kohinaisista rekisteröinneistä määritetyt polariteetit merkitään epävarmoiksi eikä niitä yleensä käytetä siirrostasoratkaisujen määrittämiseen.

Polariteettihavaintoja voidaan täydentää järistyksen **säteilykaaviota ilmentävillä P- ja S-aallon amplitudisuhteilla**. P- ja S-aallon säteilykuvioiden symmetrian vuoksi maanjäristykselle on aina kaksi mahdollista siirrostasoa: todellinen **pääsiirrostaso** (fault plane) sekä sitä vastaan kohtisuora **apusiirrostaso** (auxiliary plane). Kumpi siirrostasoista on todellisen siirroksen taso ja kumpi aputaso, määritetään sekundääristen havaintojen, esimerkiksi jälkijäristysten jakauman tai rakennegeologisten havaintojen perusteella.

Siirrostasoratkaisun määrittämisessä käytetään apuna järistyslähteen ympärille ajateltua **fokuspalloa** (focal sphere). Polariteetti- ja amplitudisuhdehavainnot asemilla projisoidaan pallolle pisteeseen, joka vastaa asemalle saapuneen aallon atsimuuttia ja lähtökulmaa järistyspisteestä. Luotettavan siirrostasoratkaisun määrittämiseksi vaaditaan vähintään yksi havainto kultakin atsimuuttineljännekseltä. Toisin sanoen, asemien pitää sijaita tasaisesti episentrin ympärillä siten, että asemien välinen suurin atsimuuttiaukko on korkeintaan 90° . Lisäksi lähteen sijainnin ja kuoren nopeusmallin on oltava tarkkoja, koska ne määräävät kuinka luotettavasti havainnot saadaan projisoitua pallolle.

Siirrostasoratkaisu esitetään graafisesti ns. rantapallona, joka vastaa fokuspallon ala- tai yläpuolta vaakatasoon projisoituna. Yläpalloprojektio sopii etenkin lyhyillä etäisyyksillä tehtyjen havaintojen tarkasteluun, sillä asemien sijainti rantapallolla vastaa silloin todellista atsimuuttisuuntaa järistyslähteestä katsottuna.

Rantapallossa siirrostopojen rajaamat puristusneljännekset väritetään, mutta venytysneljännekset jätetään valkoisiksi. Rantapallosta voi myös arvioida järjestyslähdettä ympäröivän jännityskentän suuntaa, sillä puristusneljänneksen keskellä oleva venytys- eli T-akseli ja venytysneljänneksen keskellä oleva puristus eli P-akseli vastaavat pienimmän ja suurimman puristusjännityksen suuntia.

ISSN 0781-9579

ISBN 978-952-10-9603-7

<https://hdl.handle.net/10138/326738>

Helsinki 2021